

УДК 621.43:068.4

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЙ СТЕНД КОНТРОЛЯ ПАРАМЕТРОВ РАСПЫЛЕНИЯ ПРИ РАБОТЕ ФОРСУНКИ

В.К. Кулешов, В.В. Бразовский, О.О. Ивженко

Томский политехнический университет

E-mail: altaikompozit@mail.ru

Создан экспериментальный стенд, позволяющий исследовать параметры процесса распыления. Осуществлена голографическая регистрация капель распыляемого топлива при работе форсунки дизельного двигателя А-01 в различных режимах. Исследованы скорость дисперсного потока, размеры частиц и связь этих параметров с давлением в топливной магистрали и частотой вращения вала топливного насоса высокого давления.

Ключевые слова:

Цифровая голография, лазерное излучение, гистограмма, распределение частиц, приборный комплекс, контроль параметров распыления, распылитель форсунки, дисперсный поток.

Key words:

Digital holography, laser emission, histogram, particle distribution, instrument set, control of sputtering parameters, fuel nozzle dispenser, disperse flow.

Введение

Усовершенствование рабочего процесса дизеля предполагает улучшение показателей экономичности (удельного расхода топлива и индикаторного коэффициента полезного действия) и параметров экологии (содержание вредных компонентов в отработанных газах) в основном за счет интенсификации процессов смесеобразования и сгорания.

Для улучшения процесса смесеобразования необходимо обеспечить поступление распыленного топлива в цилиндр в соответствии с определенной закономерностью, от которой в большой степени зависит процесс подвода топлива к окислителю в камере сгорания и мелкость распыливания [1]. В ряде работ [2, 3] указано, что полнота и динамика процесса сгорания непосредственно связаны с характеристикой впрыска топлива в цилиндр, испарением, смесеобразованием и закономерностями выделения теплоты при сгорании топлива.

Качественная работа форсунки в дизельном двигателе сводится к оптимизации ряда взаимосвязанных параметров: характеристики дисперсного состава, скорости струи и давления в топливной магистрали (в том числе и в момент поднятия иглы). Данные показатели в значительной степени влияют на экономические показатели дизеля, жесткость процесса сгорания, а также на токсичность отработанных газов [2].

Отсюда следует важность вопроса оптимального распределения топлива по окислителю в пространстве и во времени. И соответственно актуальна разработка приборов комплексного контроля параметров распылителей на производстве и при проведении технического обслуживания [4].

Экспериментальный приборный комплекс

Создана экспериментальная установка для измерения физических параметров форсунки дизельного двигателя, рис. 1, 2.



Рис. 1. Экспериментальная установка

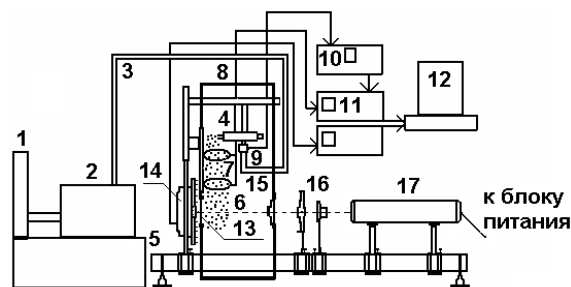


Рис. 2. Схема экспериментальной установки

На рис. 2 обозначены: 1 – емкость топлива; 2 – топливный насос; 3 – трубопровод; 4 – форсунка; 5 – крепежный штатив; 6 – дисперсный поток; 7 – сечения с датчиками; 8 – защитный кожух; 9 – тензодатчик; 10 – тензометрический усилитель; 11 – блок обработки сигналов с датчиков сечений; 12 – ПЭВМ; 13 – защитное стекло матрицы камеры; 14 – скоростная видеокамера VS-СТТ-285-2001; 15 – диафрагма; 16 – коллиматор; 17 – лазер ЛГ-72.

Топливо под давлением по трубопроводу – 3 (рис. 2) поступает в форсунку – 4, установленную на штативе – 5. Распылитель форсунки генерирует дисперсный топливный поток – 6, развивающийся через сечения – 7. Сечение состоит из кольца, в котором оппозитно друг другу расположены светоиз-

лучатель и фотодатчик. Электрический сигнал от фотодатчика поступает на блок обработки сигналов (БОС) – 11 и далее в цифровой форме в ПЭВМ – 12. Параллельно осуществляется регистрация динамики изменения давления тензодатчиком – 9, сигнал с которого обрабатывается на специальном тензометрическом усилителе – 10 и подается на вход БОС – 11. Так же осуществляется голографическая регистрация дисперсного состава струи. Излучение лазера – 17 проходит через коллиматор – 16, который состоит из 2-х линз и служит для увеличения размеров лазерного луча, что необходимо для полной засветки матрицы видеокамеры, и диафрагму – 15, необходимую для обрезания части луча по размеру матрицы, проходит через область двухфазного дисперсного потока и попадает на матрицу скоростной видеокамеры – 14. Считываемые значения поступают непосредственно в ПЭВМ – 12, где проходят обработку специальной программой, которая затем выдает информацию о размерах капель топлива.

Работа БОС – 11 осуществляется от устройства синхронизации с валом ТНВД – 2. В качестве БОС используется регистратор оптической плотности в составе программируемого усилителя УСП-16 и платы сбора данных ЛА-1,5 РСІ.

Особенностью точного измерения размера каждой капли для дальнейшего качественного сравнения является невозможность зафиксировать полномасштабный ее размер из-за достаточно высокой скорости. Это происходит из-за того, что свойством скоростной цифровой матрицы является возможность изменять в некоторых пределах время накопления сигнала, что соответствует времени выдержки при фиксации голограммы. За время накопления сигнала частица проходит в предметной области некоторый путь, который при восстановлении изображения по голограмме в предметной области отражается в виде некоторого «следа» движущейся частицы.

Измерения такого «следа» в направлении, перпендикулярном направлению движения, определяет диаметр частицы, по измерению вдоль направления движения определяется скорость движения частицы. В нашем случае такой метод определения скорости не подходит, поскольку фиксируемый «трек» является достаточно длинным и может выходить за размеры исследуемой предметной плоскости. Нельзя исключить ситуацию, когда при измерениях с помощью предлагаемого метода исследуемые частицы имеют скорости движения, выходящие за пределы возможностей скоростной цифровой камеры, т. е. минимальное время накопления сигнала скоростной цифровой камеры не позволяет считать исследуемые частицы неподвижными. Эксперименты показали, что этот факт не исключает возможности проведения измерений подобным образом, но параллельно скорость следует измерять более простыми и точными методами. Из-за указанных особенностей при расчетах

каждый «трек» рассчитывался в объеме, и за «средний диаметр» частицы принимался наименьший геометрический размер «трека».

Разработка эффективного метода контроля скоростных характеристик нестационарных, полидисперсных, двухфазных потоков, распыляемого топлива сопряжена с рядом трудностей, обусловленных случайным характером распределения жидких капель по длине и в сечении потока. Из существующих методов регистрации скорости частиц нестационарных потоков наиболее предпочтительны оптические, т. к. они не влияют на исследуемый процесс.

Исходя из условий оптимизации процесса распыливания топлива, для определения скорости двухфазных потоков наиболее приемлемы методы определения скорости потока по набору частиц, находящихся в исследуемых сечениях. Этому требованию отвечает времяпролетный метод, основанный на определении времени транспортировки при пролете потоком известного базового расстояния [5].

В методе [5] через импульсный дисперсный поток в двух сечениях на базовом расстоянии друг от друга пропускают световое излучение, измеряют его относительную интенсивность путем получения кривых изменения оптического пропускания импульсного аэродисперсного потока в двух сечениях после прохождения через поток за весь период впрыска. Затем измеряют время сдвига кривых оптического пропускания потока, сдвинутых относительно друг друга, т. е. интервал времени транспортировки потока через два сечения. После, по отношению базового расстояния между лучами к интервалу времени транспортировки импульсного дисперсного потока через эти сечения вычисляют скорость потока.

Скорость импульсного дисперсного потока $v_i(t)$ определяют из отношения базового расстояния между сечениями i и $i+1$ ко времени транспортировки этого потока через эти сечения в произвольный момент времени впрыска по формуле

$$v_i(t) = \frac{z}{t_{zi}},$$

где $v_i(t)$ – скорость потока распыленной жидкости; z – базовое расстояние между сечениями потока; t_{zi} – интервал времени транспортировки.

Измерение давления осуществляется с использованием тензометрического датчика и усилителя, рис. 3.

Тензорезистор наклеен на стальную мембрану в корпусе тензодатчика, с противоположной стороны которой создается давление топлива. Тензорезистор R_x включен по полумостовой схеме с опорным резистором $R_0=100$ Ом (рис. 4). Изменение сопротивления R_x вызывает разбаланс моста, усиливаемый усилителем У1. В блоке усилителя У1 предусмотрена возможность установки напряжения

смещения резистором R_6 при отсутствии входного сигнала. Блок усилителей Y_2 представляет собой четыре параллельно включенных усилителя с целью уменьшения собственных шумов. Тензометрический усилитель размещен в экранированном корпусе непосредственно на разъеме тензометрического датчика для увеличения соотношения сигнал/шум. Сигнал с датчика после усиления регистрировался и обрабатывался в ПЭВМ через плату сбора данных ЛА-1,5 PCI в программе цифрового осциллографа *ADCLab*.

Топливопровод



Рис. 3. Тензометрический датчик давления, установленный в систему топливоподдачи перед форсункой

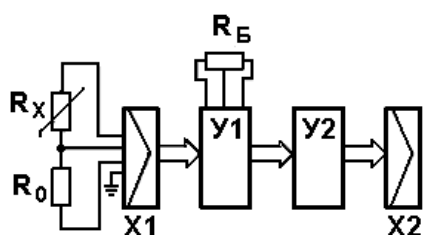


Рис. 4. Функциональная схема тензометрического датчика давления с блоком усиления. X_1 и X_2 – разъемы

Для управления временем начала голографической регистрации быстропротекающих процессов было разработано многофункциональное устройство управления синхроимпульсом СИНХРО-М [6].

Устройство управления синхроимпульсом – 9 в процессе работы анализирует состояние входных сигналов, и при возникновении на каком-либо из входов значимого события, на выходных сигналах формируются выходные импульсы, задержанные относительно момента детектирования указанного выше значимого события, выдающиеся на группу выходных разъемов.

Результаты эксперимента

Для быстрой обработки голограмм, получаемых при контроле процесса распыления топлива форсункой, авторами был разработан программный комплекс, интерфейс которого представлен на рис. 5.

Для цифрового моделирования процесса восстановления изображения по голограмме требуются знания основных принципов распространения волнового поля в пространстве. Цифровое восстановление основано на использовании приближения Кирхгофа – задачи о дифракции. Интеграл Френеля–Кирхгофа устанавливает связь между распределениями комплексной амплитуды света в плоскости объекта (или голограммы) и в плоскости, удаленной на некоторое расстояние в направлении распространения волн. Если размеры голограммы и объекта малы по сравнению с расстоянием между ними, то справедливо параксиальное приближение Френеля, которое позволяет находить комплексную амплитуду в предметной области [7].

Интенсивность в области изображения пропорциональна квадрату модуля комплексной амплитуды.

Переходя от непрерывных величин к дискретным, получаем цифровую модель для обработки экспериментальных данных. Интервал дискретизации в плоскости голограммы задается характеристиками регистрирующего материала, а в предметной плоскости определяется размерами микрочастиц и для ускорения работы программы может быть выбран плавающим. Восстановленное на ПЭВМ изображение сечения ансамбля микроча-

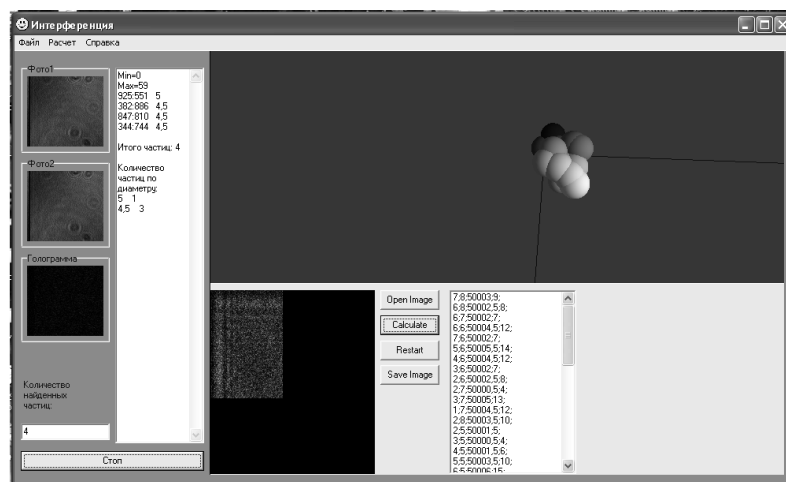


Рис. 5. Расчет поперечных срезов и объемных изображений частиц восстановленного изображения с применением поискового алгоритма

стиц необходимо обработать с целью классификации аэрозольных частиц по размерам и определения их координат. Полученные данные могут в дальнейшем использоваться для расчета, например, плотностей распределения частиц в различных точках исследуемого объема.

Применение параксиального приближения Френеля к полученной в эксперименте голограмме приводит к неудовлетворительному результату: основную яркость на картине дает дифракция Френеля исходного лазерного излучения на прямоугольном отверстии. В действительности картина содержит и информацию о регистрируемых частицах, но получить из нее нужную информацию с приемлемой точностью практически невозможно. Было предложено и реализовано следующее решение данной проблемы. На матрицу сначала регистрируется излучение лазера без исследуемых частиц, затем излучение, прошедшее через аэрозоль. Авторами применяется формат пикселей *p8bit*, который использует палитру. Цвет определяется индексом в палитре. В этом режиме палитра состоит из 256 элементов, то есть на каждый пиксель выделяется 8 бит, мы имеем доступ к функции *Scanline[]*, которая обеспечивает индексированный доступ к каждой линии пикселей. Это необходимо для реализации вычитания первой картины из второй следующим образом: проходя по всей высоте матрицы реализуется попиксельное вычитание. Но т. к. тип *byte* поддерживает значения от 0 до 255 элементов, берем такие значения по модулю. В результате этих операций остается чистая голографическая картина с единичной видимостью, которая далее подвергается численной обработке. Для увеличения точности значение диаметра частицы берется средним. Обсчет частицы ведется поочередным приращением координат x и y . Результаты численной обработки записываются в структуру, каждый элемент которой содержит переменную с плавающей точкой для записи диаметра частицы и переменную целого типа для записи количества частиц текущего диаметра.

Программа выдает диаграмму распределения частиц по диаметру. Восстановление картины с хорошим разрешением требует значительных затрат машинного времени на одно сечение в предметной области. Поэтому численный анализ полученных картин осуществляется поисковым алгоритмом по выборке отдельных зарегистрированных частиц. Поиск частицы методом Монте-Карло и дальней-

шее определение ее параметров осуществляется гораздо быстрее и обеспечивает необходимую репрезентативность выборки.

Программа выдает объемный график с двумя геометрическими координатами и третьей координатой среднего диаметра частиц. Это позволяет сделать вывод о пространственном распределении частиц. Исходя из условий, поставленных в задаче для контроля распылителя форсунки, достаточно параметра общего распределения частиц по размерам. Результатом окончательной обработки является диаграмма распределения (рис. 6).

В ходе экспериментов исследовалась форсунка дизельного двигателя А-01. Контроль параметров осуществлялся на нескольких заводских образцах одной модели форсунки, затем производилось сравнение результатов контроля каждого образца. В настоящей работе приведено графическое представление экспериментальных данных в виде гистограмм распределений. Процесс измерений повторялся 10 раз для каждого сечения с целью определения погрешности размеров капель и сопоставления их с результатами вычисления.

Измерения проводились при скорости вращения кулачкового вала топливного насоса высокого давления 500 мин⁻¹. Давление в системе впрыска (перед форсункой в момент поднятия иглы) 27 МПа. Скорость фронта 30 м/с. Результаты измерения дисперсного состава показаны на рис. 6.

Как видно из результатов эксперимента, параметры распыления у форсунок одной модели различаются, при этом различие параметров одной и той же форсунки не выходит за 5 %. Это объясняется точностью изготовления распылителей.

Измерения физических параметров форсунки проводились при разных частотах вращения кулачкового вала топливного насоса высокого давления.

Основной поток частиц, вероятно находящийся в головной части топливного потока, встречая сопротивление неподвижной среды, движется со скоростью 10...30 м/с.

При увеличении частоты вращения кулачкового вала с 500 до 850 мин⁻¹ максимальное давление топлива перед форсункой возросло с 27 до 38 МПа, средняя скорость фронта увеличилась с 30 до 60 м/с за счет возрастания объемной скорости вытеснения топлива плунжером и снижения утечек. Результаты экспериментального измерения физических параметров форсунки А-01 устанавливают

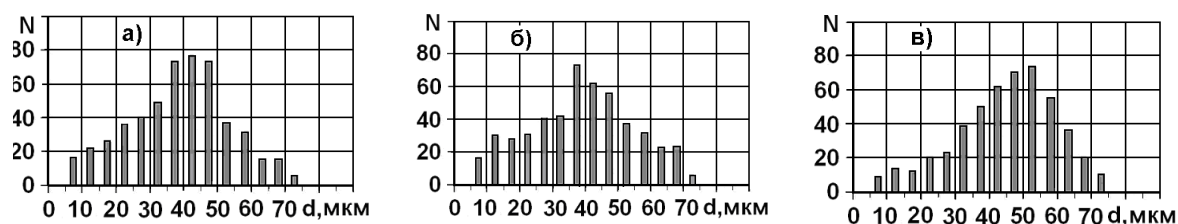


Рис. 6. Распределение числа капель N по размерам для заводских форсунок А-01. Образцы: а) 1-й, б) 2-й, в) 3-й

зависимости между частотой вращения кулачкового вала ТНВД, давлением в топливной магистрали, скоростью движения фронта и средним диаметром наибольшего количества капель (табл.).

Таблица. Результаты экспериментального измерения физических параметров форсунки А-01

Частота вращения вала ТНВД, мин ⁻¹	600	650	700	750	850
Давление впрыска топлива, МПа	27,0	29,1	32,2	35,3	37,3
Скорость впрыска u_0 , м/с	150,4	156,2	164,3	172	176,9
Скорость фронта (экспериментальная), м/с	36,7	39,7	43,9	48,0	52,6
Средний диаметр наибольшего количества капель, мкм	50	41	33	28	26

Экспериментально полученные значения скорости вершины на оси струи, лежащие в интервале от 20 до 80 м/с для дизеля А-01, позволяют сделать вывод о соответствии экспериментально полученных значений скорости фронта общеизвестным исследованиям [8].

Для расчета скорости впрыска u_0 при регистрации давления в трубопроводе перед форсункой использовалась формула:

$$u_0 = \mu_f \sqrt{\frac{2\Delta P}{\rho_m}},$$

где μ_f — коэффициент расхода форсунки, определяемый экспериментально; ΔP — разность давлений впрыска топлива и окружающей среды; ρ_m — плотность дисперсного потока.

Обсуждение результатов

Из анализа экспериментальных данных следует, что распылители контролируемых заводских образцов имеют различие по физическим параметрам (в частности, дисперсного состава распыляемого топлива, рис. 6). Это выявляется при испытании различных заводских образцов одной модели форсунки в одинаковых условиях и объясняется допуском точности при изготовлении. При установке форсунок на один двигатель желательно подбирать распылители с близкими параметрами во избежание разброса параметров топливоподачи двигателю и, как следствие, — неравномерности работы двигателя. Предлагается контролируемые распылители разбивать по группам с однотипными параметрами для установки на один двигатель распылителей одной группы (т. е. ввести систему, которая в

технике применяется при изготовлении поршневых групп). Такой подход предполагает принятие производственного эталона — распылителя и топливного насоса — с наилучшей общей характеристикой впрыска.

Приведенная методика и созданный стенд комплексного контроля топливных распылителей пригоден в условиях массового производства.

Разработанный метод позволил точнее контролировать физические параметры форсунок топливной аппаратуры.

Параметры частоты вращения вала ТНВД, изменение давления в топливной магистрали, скоростные параметры дисперсного состава распыляемого топлива неразделимо связаны между собой, что видно из результатов проведенных экспериментов (табл.). Эта связь происходит при возрастании объемной скорости вытеснения топлива плунжером и снижении утечек. Дисперсный состав топлива жестко связан со скоростным параметром распыления, т. е. в ходе экспериментов было выявлено, что при большей скорости потока наблюдалось уменьшение среднего диаметра распыляемых капель.

Перечисленное выше говорит о целесообразности использования разработанного стенда контроля при изготовлении распылителей форсунок, а также о необходимости проведения опытно-доводческих операций при создании новых конструкций распылителей.

Выводы

1. Создан экспериментальный стенд, позволяющий исследовать параметры процесса распыления жидкофазных сред форсунками.
2. Разработано и обосновано применение голографического метода для контроля дисперсного состава капель струи распыленного топлива, заключающегося в регистрации частиц, движущихся со скоростями свыше 30 м/с.
3. Осуществлена комплексная регистрация параметров капель распыляемого топлива на примере работы форсунки дизельного двигателя А-01.
4. Установлены зависимости между частотой вращения кулачкового вала топливного насоса высокого давления, давлением в топливной магистрали, скоростью движения фронта распыленной жидкости и средним диаметром наибольшего количества капель.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Смайлис В.И. Современное состояние и новые проблемы экологии дизелестроения // Двигателестроение. — 1991. — № 1. — С. 3–6.
2. Семенов Б.Н., Зявлин М.Я., Новоселов В.Д. Повышение топливной экономичности тепловозных дизелей: Улучшение технико-экономических и экологических показателей отечественных дизелей // Труды ЦНИДИ. — Л.: ЦНИДИ, 1988. — С. 29–38.
3. Семенов Б.Н., Павлов Е.П., Копцев В.П. Рабочий процесс высокооборотных дизелей малой мощности. — Л.: Машиностроение, 1990. — 240 с.
4. Матиевский Д.Д. Метод анализа индикаторного КПД рабочего цикла дизеля // Двигателестроение. — 1984. — № 6. — С. 7–11.
5. Кукушкин В.Л. Методы оценки характеристик нестационарной струи распыленного дизельного топлива с помощью лазеров непрерывного излучения // Двигателестроение. — 1988. — № 12. — С. 28–30.

6. Смайлис В.И. Малотоксичные дизели. — Л.: Машиностроение, 1972. — 128 с.
7. Еськов А.В. Приборы и методы оптического контроля параметров распыления топлива дизельными форсунками. — Барнаул: Изд-во АлтГТУ, 2007. — 92 с.
8. Бразовский В.В., Вагнер В.А., Евстигнеев В.В., Еськов А.В., Пролубников В.И., Тубалов Н.П. Голографический метод исследования дисперсного состава аэрозоля // Горизонты образования. — 2006. — Вып. 8. — С. 1–9.
9. Разлейцев Н.Ф. Моделирование и оптимизация процесса сгорания в дизелях. — Харьков: Вища школа, 1980. — 170 с.

Поступила 30.09.2009 г.

УДК 621.43:068.4

КОНТРОЛЬ ПАРАМЕТРОВ ПРОДУКТОВ СГОРАНИЯ В ФИЛЬТРАЦИОННЫХ УСТАНОВКАХ

В.К. Кулешов, В.В. Бразовский, В.А. Баранов

Томский политехнический университет
E-mail: altaikompozit@mail.ru

Исследованы параметры отработавших газов дизельного двигателя в полостях фильтров методом многоканального зондирования. Регистрация параметров сажи осуществлялась голографической установкой, кроме того проводилось измерения температуры и химического состава газов в местах контроля с последующей компьютерной обработкой результатов. Установлено, что на процесс фильтрования частиц оказывает существенное влияние избыток окислителя в реакторе фильтра, противодействие на выпуске и пористость фильтров, а после них повышается температура отработанных газов, что свидетельствует о протекании экзотермических реакций в пористой стенке.

Ключевые слова:

Цифровая голография, фильтрация отработанных газов, гистограмма, распределение частиц, приборный комплекс, контроль параметров твердых частиц, дисперсный поток.

Key words:

Digital holography, exhaust gas filtration, histogram, particle distribution, instrument set, control of solid particle parameters, disperse flow.

Введение

Состав продуктов сгорания углеводородных топлив насчитывает более 1200 компонентов. Из них в настоящее время нормируются стандартами только оксид углерода, оксид азота, углеводороды и твердые частицы. В понятие «твердые частицы», кроме сажевых частиц, включаются частицы топлива, масел, твердые органически нерастворимые и органически растворимые фракции продуктов разложения углеводородов, сульфиты воды. Дизели выбрасывают в окружающую среду с отработанными газами значительное количество твердых частиц сажи, являющихся абсорбентом для полициклических ароматических углеводородов, часть из которых обладает канцерогенными свойствами [1–3]. Твердые частицы при сгорании углеводородных топлив имеют различную дисперсность. Дисперсность существенно зависит от условий и режимов сжигания топлива. Дизельная сажа не является чистым углеродом и содержит водород, кислород, летучие, зольные, коксовые соединения. Удельная поверхность сажи значительна и может достигать 300 м²/г. В отработанных газах сажа находится в виде образований неправильной формы с линейными размерами от 0,3 до 100 мкм, зависящими от режима эксплуатации дизеля. Дизельная сажа склонна к образованию конгломератов, содержащих от сотен до тысяч частиц, отличающихся значительной

прочностью. Частица диаметром около 10 мкм, например, имеет массу порядка 10^{–10} мг [4]. Это позволяет частице сажи длительное время находиться в атмосфере во взвешенном состоянии.

При контроле эффективности очистки сажи в отработавших газах необходимо учитывать тот факт, что возможно неравномерное распределение сажи по сечению выпускного коллектора, а также по полостям фильтрационной системы. Учитывая это обстоятельство, становится актуальным производить многоканальные исследования полостей фильтрационных систем. Это необходимо для понимания процессов, происходящих при очистке, и выработки оптимальных параметров фильтрации.

Стенд многоканального контроля полостей каталитического нейтрализатора

Поскольку спектр выбросов отработанных газов очень широк и зависит как от режима работы двигателя, так и от состава топлива и присадок к нему, методы исследования качественного и количественного состава выбросов чрезвычайно разнообразны [4]. Для данного исследования применен приборный комплекс измерения дисперсности конденсированной фазы отработанных газов [5], в котором регистрация сажи осуществляется методом цифровой голографии [6].